

【外国語明細書】

IAP5 Rec'd PCT/PTO 13 FEB 2006

1 Title of Invention

METHOD AND APPARATUS FOR DETECTING POLISHING ENDPOINT
WITH OPTICAL MONITORING

2 Claims

1. An endpoint detection method for chemical mechanical polishing, comprising:
 - a) bringing a surface of a substrate into contact with a polishing pad;
 - b) causing relative motion between the substrate and the polishing pad;
 - c) directing a light beam to contact the surface of the substrate;
 - d) moving the light beam in a path across the substrate surface;
 - e) monitoring an intensity signal produced by the light beam reflecting off the substrate;
 - f) extracting a plurality of intensity measurements from the intensity signal as the light beam moves across the substrate;
 - g) selecting a first extreme intensity measurement from the plurality of intensity measurements;
 - h) iterating steps c)-g) for a plurality of sweeps of the light beam across the substrate to generate a first plurality of extreme intensity measurements; and
 - i) detecting a polishing endpoint based on the first plurality of extreme intensity measurements.
2. The method of claim 1, wherein the first extreme intensity measurement is a maximum intensity measurement from the plurality of intensity measurements.
3. The method of claim 1, wherein the first extreme intensity measurement is a minimum intensity measurement from the plurality of intensity measurements.
4. The method of claim 1, further comprising selecting a second extreme intensity measurement from the plurality of intensity measurements.

5. The method of claim 4, wherein the first extreme intensity measurement is a maximum intensity measurement and the second extreme intensity measurement is a minimum intensity measurement from the plurality of intensity measurements.
6. The method of claim 5, wherein detecting a polishing endpoint includes subtracting the minimum intensity measurement for each iteration from the maximum intensity measurement from that iteration to create a plurality of differential intensity measurement.
7. The method of claim 4, wherein detecting a polishing endpoint includes determining if criteria associated with either the first or second plurality of extreme intensity measurements are satisfied.
8. The method of claim 4, wherein detecting a polishing endpoint includes determining if criteria associated with both the first and second plurality of extreme intensity measurements are satisfied.
9. The method of claim 1, wherein the substrate includes a filler layer disposed over a stop layer, and the filler layer abuts the polishing pad.
10. The method of claim 9, wherein the polishing endpoint indicates that the stop layer is at least partially exposed.
11. The method of claim 10, wherein the filler layer is a metal layer and the stop layer is a dielectric layer.
12. The method of claim 11, wherein the first extreme intensity measurement is a minimum intensity measurement from the plurality of intensity measurements.

13. The method of claim 9, wherein the polishing endpoint indicates that the stop layer is substantially exposed.
14. The method of claim 13, wherein the filler layer is a metal layer and the stop layer is a dielectric layer.
15. The method of claim 14, wherein the first extreme intensity measurement is a maximum intensity measurement from the plurality of intensity measurements.
16. The method of claim 14, further comprising calculating an average intensity from the plurality of intensity measurements for each iteration.
17. The method of claim 16, the polishing endpoint is based on the average intensity measurements.
18. The method of claim 1, wherein the polishing pad includes a window, the light beam is directed through the window, and the motion of the polishing pad relative to the substrate causing the light beam to move across the substrate surface.
19. The method of claim 18, wherein the polishing pad rotates to create relative motion between the substrate and polishing pad.
20. The method of claim 1, further comprising:
 - determining a radial position for each intensity measurement;
 - dividing the intensity measurements into a plurality of radial ranges according to the radial positions; and
 - selecting an extreme intensity measurement from the intensity measurements in each of the plurality of radial ranges.
21. The method of claim 1, further comprising stopping

polishing at the polishing endpoint.

22. The method of claim 1, further comprising changing a polishing parameter at the polishing endpoint.

23. The method of claim 22, wherein the polishing parameter is a polishing consumable.

24. The method of claim 23, wherein the polishing consumable is a slurry.

25. The method of claim 24, wherein the slurry is changed from a high-selectivity slurry to a low-selectivity slurry.

26. An polishing control method for chemical mechanical polishing, comprising:

- a) bringing a surface of the substrate into contact with a polishing pad;
- b) causing relative motion between the substrate and the polishing pad;
- c) directing a light beam to contact the surface of the substrate;
- d) causing the light beam to move in a path across the substrate surface;
- e) monitoring an intensity signal produced by the light beam reflecting off the substrate;
- f) extracting a plurality of intensity measurements from the intensity signal as the light beam moves across the substrate;
- g) selecting a minimum intensity measurement from the plurality of intensity measurements;
- h) selecting a maximum intensity measurement from the plurality of intensity measurements;
- i) iterating steps c)-h) for a plurality of sweeps of the light beam across the substrate to generate a plurality of

minimum intensity measurements and a plurality of maximum intensity measurements;

j) detecting a first polishing endpoint based on the plurality of minimum intensity measurements; and

k) detecting a second polishing endpoint based on a plurality of maximum intensity measurements.

27. An endpoint detection method for chemical mechanical polishing, comprising:

a) bringing a surface of the substrate into contact with a polishing pad;

b) causing relative motion between the substrate and the polishing pad;

c) directing a light beam to contact the surface of the substrate;

d) causing the light beam to move in a path across the substrate surface;

e) monitoring an intensity signal produced by the light beam reflecting off the substrate;

f) extracting a plurality of intensity measurements from the intensity signal as the light beam moves across the substrate;

g) determining a radial position for each intensity measurement;

h) dividing the intensity measurements into a plurality of radial ranges according to the radial positions;

i) selecting an extreme intensity measurement from the intensity measurements in each of the plurality of radial ranges.

j) iterating steps c)-i) for a plurality of sweeps of the light beam across the substrate to generate a plurality of extreme intensity measurements in each of the plurality of radial ranges; and

k) detecting a polishing endpoint based on the plurality of extreme intensity measurements in the plurality of radial ranges.

3 Detailed Description of Invention

BACKGROUND

The present invention relates generally to chemical mechanical polishing of substrates, and more particularly to methods and apparatus for detecting an end-point during a chemical mechanical polishing operation.

An integrated circuit is typically formed on a substrate by the sequential deposition of conductive, semiconductive or insulative layers on a silicon wafer. One fabrication step involves depositing a filler layer over a patterned stop layer, and planarizing the filler layer until the stop layer is exposed. For example, a conductive filler layer may be deposited on a patterned insulative stop layer to fill the trenches or holes in the stop layer. After planarization, the portions of the conductive layer remaining between the raised pattern of the insulative layer form vias, plugs and lines that provide conductive paths between thin film circuits on the substrate.

Chemical mechanical polishing (CMP) is one accepted method of planarization. This planarization method typically requires that the substrate be mounted on a carrier or polishing head. The exposed surface of the substrate is placed against a rotating polishing disk pad or belt pad. The polishing pad may be either a "standard" pad or a fixed-abrasive pad. A standard pad has a durable roughened surface, whereas a fixed-abrasive pad has abrasive particles held in a containment media. The carrier head provides a controllable load, i.e., pressure, on the substrate to push it against the polishing pad. A polishing slurry, including at least one chemically-reactive agent, and abrasive particles if a standard pad is used, is supplied to the surface of the polishing pad.

One problem in CMP is determining whether the polishing process is complete, i.e., whether a substrate layer has been planarized to a desired flatness or thickness. Variations in the

initial thickness of the substrate layer, the slurry composition, the polishing pad condition, the relative speed between the polishing pad and the substrate, and the load on the substrate can cause variations in the material removal rate. These variations cause variations in the time needed to reach the polishing endpoint. Therefore, the polishing endpoint cannot be determined merely as a function of polishing time.

One way to determine the polishing endpoint is to remove the substrate from the polishing surface and examine it. For example, the substrate may be transferred to a metrology station where the thickness of a substrate layer is measured, e.g., with a profilometer or a resistivity measurement. If the desired specifications are not met, the substrate is reloaded into the CMP apparatus for further processing. This is a time-consuming procedure that reduces the throughput of the CMP apparatus. Alternatively, the examination might reveal that an excessive amount of material has been removed, rendering the substrate unusable.

More recently, in-situ optical monitoring of the substrate has been performed, e.g., with an interferometer or reflectometer, in order to detect the polishing endpoint. For example, when polishing a metal layer to expose an underlying insulative or dielectric layer, the reflectivity of the substrate will drop abruptly when the metal layer is removed. This drop can be detected to signal the polishing endpoint. Unfortunately, even when there is a sharp change in reflectivity, it may be difficult to determine the proper endpoint.

SUMMARY

In one aspect, the invention is directed to an endpoint detection method for chemical mechanical polishing. In the method, a surface of a substrate is brought into contact with a polishing pad, and relative motion between the substrate and the polishing pad is created. A light beam is directed to contact the surface of the substrate, and the light beam is moved in a

path across the substrate surface. An intensity signal produced by the light beam reflecting off the substrate is monitored, and a plurality of intensity measurements are extracted from the intensity signal as the light beam moves across the substrate. A first extreme intensity measurement is derived from the plurality of intensity measurements. The steps are iterated for a plurality of sweeps of the light beam across the substrate to generate a first plurality of extreme intensity measurements, and a polishing endpoint is detected based on the first plurality of extreme intensity measurements.

Implementations of the invention may include the following features. The first extreme intensity measurement is a maximum or minimum intensity measurement from the plurality of intensity measurements. A second extreme intensity measurement may be selected from the plurality of intensity measurements. The minimum intensity measurement for each iteration may be subtracted from the maximum intensity measurement from that iteration to create a plurality of differential intensity measurement. Detecting a polishing endpoint may include determining if criteria associated with either of the first or second plurality of extreme intensity measurements are satisfied. Alternatively, detecting a polishing endpoint may include determining if criteria associated with both the first and second plurality of extreme intensity measurements are satisfied. The substrate may include a filler layer, e.g., a metal layer, disposed over a stop layer, e.g., a dielectric layer, with the filler layer abutting the polishing pad. The polishing endpoint may indicate that the stop layer is at least partially exposed or that the stop layer is substantially exposed. An average intensity may be calculated from the plurality of intensity measurements for each iteration, and the polishing endpoint may be based on the average intensity measurements. The polishing pad may include a window, the light beam may be directed through the window, and the motion of the polishing pad relative to the substrate may cause the light beam to move across the substrate

surface. A radial position for each intensity measurement may be determined. The intensity measurements may be divided into a plurality of radial ranges according to the radial positions. An extreme intensity measurement may be selected from the intensity measurements in each of the plurality of radial ranges. Polishing may be stopped at the polishing endpoint, or a polishing parameter, such as a polishing consumable, e.g., a slurry, may be changed at the polishing endpoint.

Advantages of the invention include one or more of the following. A wider range of endpoint detection algorithms are available, making the optical monitoring system useful in a wider range of polishing procedures. The endpoint detection procedure is more robust and less likely to fail. Endpoint detection during metal polishing is improved. The polishing pressure, polishing speed, chemistry, and slurry composition may be altered when an underlying oxide layer is first exposed, and polishing may be stopped more precisely when the entire oxide and barrier layer have been removed.

Other features and advantages of the invention will become apparent from the following description, including the drawings and claims.

DETAILED DESCRIPTION

Referring to FIGS. 1 and 2, one or more substrates 10 may be polished by a CMP apparatus 20. A description of a similar polishing apparatus 20 may be found in U.S. Patent No. 5,738,574, the entire disclosure of which is incorporated herein by reference. Polishing apparatus 20 includes a series of polishing stations 22 and a transfer station 23. Transfer station 23 transfers the substrates between the carrier heads and a loading apparatus.

Each polishing station includes a rotatable platen 24 on which is placed a polishing pad 30. The first and second stations may include a two-layer polishing pad with a hard durable outer surface or a fixed-abrasive pad with embedded abrasive particles. The final polishing station may include a relatively soft pad. Each polishing station may also include a pad conditioner apparatus 28 to maintain the condition of the polishing pad so that it will effectively polish substrates.

A two-layer polishing pad 30 typically has a backing layer 32 which abuts the surface of platen 24 and a covering layer 34 which is used to polish substrate 10. Covering layer 34

is typically harder than backing layer 32. However, some pads have only a covering layer and no backing layer. Covering layer 34 may be composed of an open cell foamed polyurethane or a sheet of polyurethane with a grooved surface. Backing layer 32 may be composed of compressed felt fibers leached with urethane. A two-layer polishing pad, with the covering layer composed of IC-1000 and the backing layer composed of SUBA-4, is available from Rodel, Inc., of Newark, Delaware (IC-1000 and SUBA-4 are product names of Rodel, Inc.).

A rotatable multi-head carousel 60 is supported by a center post 62 and is rotated thereon about a carousel axis 64 by a carousel motor assembly (not shown). Center post 62 supports a carousel support plate 66 and a cover 68. Carousel 60 includes four carrier head systems 70. Center post 62 allows the carousel motor to rotate carousel support plate 66 and to orbit the carrier head systems and the substrates attached thereto about carousel axis 64. Three of the carrier head systems receive and hold substrates, and polish them by pressing them against the polishing pads. Meanwhile, one of the carrier head systems receives a substrate from and delivers a substrate to transfer station 23.

Each carrier head system includes a carrier or carrier head 80. A carrier drive shaft 74 connects a carrier head rotation motor 76 (shown by the removal of one quarter of cover 68) to each carrier head 80 so that each carrier head can independently rotate about its own axis. In addition, each carrier head 80 independently laterally oscillates in a radial slot 72 formed in carousel support plate 66.

The carrier head 80 performs several mechanical functions. Generally, the carrier head holds the substrate against the polishing pad, evenly distributes a downward pressure across the back surface of the substrate, transfers torque from the drive shaft to the substrate, and ensures that the substrate does not slip out from beneath the carrier head during polishing operations.

Carrier head 80 may include a flexible membrane 82 that provides a mounting surface for substrate 10, and a retaining ring 84 to retain the substrate beneath the mounting surface. Pressurization of a chamber 86 defined by flexible membrane 82 forces the substrate against the polishing pad. Retaining ring 84 may be formed of a highly reflective material, or it may be coated with a reflective layer to provide it with a reflective lower surface 88. A description of a similar carrier head 80 may be found in U.S. Patent Application Serial No. 08/861,260, filed May 21, 1997, the entire disclosure of which is incorporated by reference.

A slurry 38 containing a reactive agent (e.g., deionized water for oxide polishing) and a chemically-reactive catalyzer (e.g., potassium hydroxide for oxide polishing) may be supplied to the surface of polishing pad 30 by a slurry supply port or combined slurry/rinse arm 39. If polishing pad 30 is a standard pad, slurry 38 may also include abrasive particles (e.g., silicon dioxide for oxide polishing).

In operation, the platen is rotated about its central axis 25, and the carrier head is rotated about its central axis 81 and translated laterally across the surface of the polishing pad.

A hole 26 is formed in platen 24 and a transparent window 36 is formed in a portion of polishing pad 30 overlying the hole. Transparent window 36 may be constructed as described in U.S. Patent Application Serial No. 08/689,930, filed August 26, 1996, the entire disclosure of which is incorporated herein by reference. Hole 26 and transparent window 36 are positioned such that they have a view of substrate 10 during a portion of the platen's rotation, regardless of the translational position of the carrier head.

An optical monitoring system 40, which can function as a reflectometer or interferometer, is secured to platen 24 generally beneath hole 26 and rotates with the platen. The optical monitoring system includes a light source 44 and a

detector 46. The light source generates a light beam 42 which propagates through transparent window 36 and slurry 38 (see FIG. 3) to impinge upon the exposed surface of substrate 10. For example, the light source 44 may be a laser and the light beam 42 may be a collimated laser beam. The light laser beam 42 can be projected from laser 44 at an angle α from an axis normal to the surface of substrate 10, i.e., at an angle α from axes 25 and 81. In addition, if the hole 26 and window 36 are elongated, a beam expander (not illustrated) may be positioned in the path of the light beam to expand the light beam along the elongated axis of the window. Laser 44 may operate continuously. Alternatively, the laser may be activated to generate laser beam 42 during a time when hole 26 is generally adjacent substrate 10.

The CMP apparatus 20 may include a position sensor 160, such as an optical interrupter, to sense when window 36 is near the substrate. For example, the optical interrupter could be mounted at a fixed point opposite carrier head 80. A flag 162 is attached to the periphery of the platen. The point of attachment and length of flag 162 is selected so that it interrupts the optical signal of sensor 160 while window 36 sweeps beneath substrate 10.

In operation, CMP apparatus 20 uses optical monitoring system 40 to determine the amount of material removed from the surface of the substrate, or to determine when the surface has become planarized. A general purpose programmable digital computer 48 may be connected to laser 44, detector 46 and sensor 160. Computer 48 may be programmed to activate the laser when the substrate generally overlies the window, to store intensity measurements from the detector, to display the intensity measurements on an output device 49, to store the intensity measurement, to sort the intensity measurements into radial ranges, and to apply the endpoint detection logic to the measured signals to detect the polishing endpoint.

Referring to FIG. 3, a substrate 10 includes a silicon wafer 12 and an overlying metal layer 16 disposed over an oxide

or nitride layer 14. The metal may be copper, tungsten, aluminum, among others. As different portions of the substrate with different reflectivities are polished, the signal output from the detector 46 varies with time. Particularly, when the metal layer 16 has been polished away to expose the oxide or nitride layer 14, the reflectivity of the substrate drops. The time varying output of detector 46 may be referred to as an in-situ reflectance measurement trace (or more simply, a reflectance trace). As discussed below, this reflectance trace may be used to determine the end-point of the metal layer polishing operation.

Generally, the reflected intensity undergoes different changes during polishing for different radial positions on the substrate. This is because the metal layer may be removed at different rates for different portions of the substrate. For instance, the metal layer near the center of the substrate may be removed last, while the metal layer near the perimeter or edge of the substrate may be removed first, or vice versa. However, with the optical monitoring system, the reflection data from the entire wafer is captured at a relatively fine time scale in the order of milliseconds and is available for determination of the polishing endpoint.

Referring to FIG. 4, the combined rotation of the platen and the linear sweep of the carrier head causes window 36 (and thus laser beam 42) to sweep across the bottom surface of carrier head 80 and substrate 10 in a sweep path 120. Referring to FIG. 5, as the laser beam sweeps across the substrate, optical monitoring system 40 generates a series of intensity measurements $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$ (the number N can differ from sweep to sweep). The sample rate F (the rate at which intensity measurements are generated) of optical monitoring system 40 may be about 500 to 2000 Hertz (Hz), or even higher, corresponding to a sampling period between about 0.5 and 2 milliseconds.

Each time the window sweeps beneath the substrate, the computer 48 extracts a value from the series of intensity

measurements $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$. For example, the series of intensity measurements can be averaged to generate a mean intensity I_{MEAN} . Alternately, the computer can extract the minimum intensity I_{MIN} from the series, or the maximum intensity I_{MAX} . In addition, the computer can generate an intensity difference I_{DIF} equal to the difference between the maximum and minimum intensities, i.e., $I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}$.

A series of values extracted by computer 48 for a series of sweeps can be stored in memory or non-volatile storage. Referring to FIGS. 6A-6D, this series of extracted values (with one extracted value per sweep) can be assembled and displayed as a function of measurement time to provide the time-varying trace of the reflectivity of the substrate. This time-varying trace may also be filtered to remove noise. FIG. 6A shows a reflectivity trace generated from the mean intensity I_{MEAN} of each sweep, FIG. 6B shows a reflectivity trace generated from the maximum intensity I_{MAX} of each sweep, FIG. 6C shows a reflectivity trace generated from the minimum intensities I_{MIN} of each sweep, and FIG. 6D shows a reflectivity trace generated from the intensity difference I_{DIF} of each sweep.

The overall shapes of the minimum, maximum and average intensity traces may be explained as follows. Initially, the metal layer 16 has some initial topography because of the topology of the underlying patterned layer 14. Due to this topography, the light beam scatters when it impinges the metal layer. As the polishing operation progresses, the metal layer becomes more planar and the reflectivity of the polished metal layer increases. As the bulk of the metal layer is removed, the intensity remains relatively stable. Once the oxide layer begins to be exposed, the overall signal strength declines until the polishing operation is completed. Although the overall shapes of the minimum, maximum and average intensity traces are similar, the different traces have different shapes because different procedures have been used to extract the data points of the traces from the underlying intensity measurements.

The maximum intensity trace, minimum intensity trace and differential intensity trace are particularly useful in the endpoint analysis during metal polishing. Specifically, the minimum intensity trace will tend to begin to drop as soon as the oxide layer is first exposed. In contrast, the maximum intensity trace will tend to begin to drop only after the metal layer is almost entirely removed and the oxide layer is entirely exposed, i.e., after the minimum intensity trace has begun to drop. Thus, the minimum intensity trace can be used for detection of the initial clearing of a spot on the oxide, and the maximum intensity trace can be used for detection of complete metal removal. The average intensity trace will fall somewhere between the minimum and maximum intensity traces. The differential intensity trace provides a measure of the non-uniformity of the substrate, since it will be largest when the metal has been removed to expose some, but not all, of the underlying oxide.

Given the four intensity traces, a wide variety of endpoint detection algorithms can be implemented. Separate endpoint criteria (e.g., based on local minima or maxima, slope, or threshold values) can be created for each type of trace. Then the endpoint conditions for the various traces can be combined with Boolean logic. For example, polishing could be stopped when the endpoint conditions for either the maximum intensity trace or the differential trace have been met. As another example, polishing could be stopped only when the endpoint conditions for both the minimum intensity trace and the average intensity trace have been met. As noted, any combination of endpoint criteria for two or more of the traces is possible.

The different endpoint traces may also be used to trigger different polishing events. The minimum intensity trace may be used to trigger a change in polishing parameters. For example, the polishing pressure, polishing speed, chemistry, and slurry composition may be altered when the underlying oxide layer is first exposed. Specifically, the system may change from a high-selectivity to a low-selectivity slurry in order to avoid

dishing. Polishing may be halted based on the detection of the endpoint in the maximum intensity signal, since this will occur only once the metal has been entirely removed.

The average, minimum, maximum and differential intensity traces may also be created for a plurality of radial ranges on the substrate. The generation of intensity traces for a plurality of radial ranges is discussed in U.S. Application Serial No. 09,184,767, filed November 2, 1998, the entirety of which is incorporated by reference. As previously noted, the combined rotation of the platen and the linear sweep of the carrier head causes window 36 (and thus laser beam 42) to sweep across the bottom surface of carrier head 80 and substrate 10 in a sweep path 120. Turning now to FIG. 7, the radial positions R_1, R_2, \dots, R_n of the corresponding intensity measurements I_1, I_2, \dots, I_n can be determined. One way to determine the radial position of an intensity measurement is to calculate the position of the laser beneath the substrate based on the measurement time, the platen rotation rate, and carrier head sweep profile. Unfortunately, the actual platen rotation rate and carrier head sweep profile may not precisely match the polishing parameters. Therefore, a preferred method 130 of determining the radial positions of the intensity measurements is shown in FIG. 8A. First, the time T_{sym} at which laser beam 42 passes beneath a mid-line 124 (see FIG. 5C) of the substrate is determined (step 132). Then the radial positions of the intensity measurements are determined from the time difference between the measurement time $T_{measure}$ and the symmetric time T_{sym} (step 134).

One method of determining the symmetry time T_{sym} is to average the times of the first and last large intensity measurements from each sweep, as these intensity measurements should correspond to the substrate edge. However, this results in some uncertainty in T_{sym} because the positions of the intensity measurements on the substrate are not known.

Referring to FIG. 8B, in order to compute the symmetric time T_{sym} in step 132, computer 48 determines the first and last

large intensity measurements from sweep path 120, and stores the corresponding measurement times T_{lead} and T_{trail} . These lead and trail times T_{lead} and T_{trail} are accumulated on each sweep to generate a series of lead times T_{lead1} , T_{lead2} , ... T_{leadN} and trail times T_{trail1} , T_{trail2} , ... T_{trailN} . Computer 48 stores lead times T_{lead1} , T_{lead2} , ... T_{leadN} and the associated number of platen rotations 1, 2, ... N for each leading intensity measurement 96. Similarly, computer 48 stores the trail times T_{trail1} , T_{trail2} , ... T_{trailN} and the associated number of rotations 1, 2, ... N of each trailing measurement. Assuming that platen 24 rotates at a substantially constant rate, the times T_{lead1} , T_{lead2} , ... T_{leadN} form a substantially linear increasing function (shown by line 136). Similarly, the times T_{trail1} , T_{trail2} , ... T_{trailN} also form a substantially linear increasing function (shown by line 137). Computer 48 performs two least square fits to generate two linear functions $T_{lead}(n)$ and $T_{trail}(n)$ as follows:

$$T_{lead}(n) = a_1 + (a_2 * n)$$

$$T_{trail}(n) = a_3 + (a_4 * n)$$

where n is the number of platen rotations and a_1 , a_2 , a_3 , and a_4 are fitting coefficients calculated during the least square fit. Once the fitting coefficients have been calculated, the symmetry time T_{sym} at which laser beam 42 crosses mid-line 124 (shown by phantom line 138) may be calculated as follows:

$$T_{sym} = \frac{a_1 + a_3}{2} + \frac{a_2 + a_4}{2} \cdot n$$

By using a least square fit over several platen rotations to calculate the symmetry time T_{sym} , uncertainty caused by the differences in the relative position of the sampling zone beneath the retaining ring is substantially reduced, thereby significantly reducing uncertainty in the symmetry time T_{sym} .

Once computer 48 has calculated the time T_{sym} at which laser beam 42 crosses midline 124, the radial distance R_1 , R_2 , ... R_n of each intensity measurement from the center 126 of the substrate are calculated in step 132. Referring to FIG. 10, the radial position may be calculated as follows:

$$R = \sqrt{d^2 + L^2 - 2dL\cos\theta}$$

where d is the distance between the center of the polishing pad and the center of window 36, L is the distance from the center of the polishing pad to the center of substrate 10, and θ is the angular position of the window. The angular position θ of the window may be calculated as follows:

$$\theta = f_{\text{platen}} \cdot 2\pi(T_{\text{measure}} - T_{\text{sym}})$$

where f_{platen} is the rotational rate of the platen (in rpm). Assuming that the carrier head moves in a sinusoidal pattern, the linear position L of the carrier head may be calculated as follows:

$$L = L_0 + A \cdot \cos(\omega \cdot T_{\text{measure}})$$

where ω is the sweep frequency, A is the amplitude of the sweep, and L_0 is the center position of the carrier sweep.

In another embodiment, position sensor 160 could be used to calculate the time T_{sym} when the window crosses midline 124. Assuming that sensor 160 is positioned opposite carrier head 80, flag 162 would be positioned symmetrically across from transparent window 36. The computer 48 stores both the trigger time T_{start} when the flag interrupts an optical beam of the sensor, and the trigger time T_{end} when the flag clears the optical beam. The time T_{sym} may be calculated as the average of T_{start} and T_{end} . In yet another embodiment, the platen and carrier head positions could be determined at each measurement time from optical encoders connected to the platen drive motor and radial drive motor, respectively.

Once the radial positions R_1, R_2, \dots, R_n of the intensity measurements have been calculated, some of the intensity measurement may be disregarded. If the radial position R of an intensity measurement is greater than the radius of the substrate, then that intensity measurement includes radiation reflected by the retaining ring or background reflection from the

window or slurry. The intensity measurements made beneath the retaining ring can be ignored. This ensures that spurious intensity measurements are not used in the calculation of the thin film layer reflected intensity.

After several sweeps of laser beam 42 beneath the substrate, computer 48 accumulates a set of intensity measurements I_1, I_2, \dots, I_N , each associated with a measurement time T_1, T_2, \dots, T_N , and a radial position R_1, R_2, \dots, R_N . Referring to FIG. 11, as the intensity, time, and radial position measurements are accumulated, the time and intensity measurements are sorted into bins in a data structure 140. Each bin is associated with a radial range on the substrate. For example, intensity measurements made up to 20 mm from the center of the substrate may be placed in a first bin 142, intensity measurements made between 20 and 30 mm from the center of the substrate may be placed in a second bin 144, intensity measurements made between 30 and 40 mm from the center of the substrate may be placed in a third bin 146, and so on. The exact number of bins and the radial ranges of the bins depend upon the information that the user desires to extract. In general, the radial range of each bin may be selected so that a sufficient number of intensity measurements are accumulated in the bin to provide visually meaningful information.

Once the intensity measurements have been sorted into radial ranges, the calculations discussed above to determine the average, minimum, maximum or difference in intensity are performed for each bin, thereby providing four types of intensity traces for each radial range across the surface of the substrate. Separate endpoint criteria (e.g., based on local minima or maxima, slope, or threshold values) can be created for each type of intensity trace in each radial range. The endpoint conditions for the various traces and radial ranges can be combined with Boolean logic. For example, an endpoint may be triggered if the conditions for any of several radial ranges are met, or the endpoint may be triggered only if the conditions for multiple

radial ranges are met. Thus, a wide variety of endpoint detection algorithms can be implemented.

The present invention has been described in terms of a preferred embodiment. The invention, however, is not limited to the embodiment depicted and described. Rather, the scope of the invention is defined by the appended claims.

4 Brief Description of Drawings

FIG. 1 is an exploded perspective view of a chemical mechanical polishing apparatus.

FIG. 2 is a side view of a chemical mechanical polishing apparatus including an optical reflectometer.

FIG. 3 is a simplified cross-sectional view of a substrate being processed, schematically showing a laser beam impinging on and reflecting from the substrate.

FIG. 4 is a schematic view illustrating the path of a laser beneath the carrier head.

FIG. 5 is graph showing intensity measurements from the optical monitoring system in arbitrary intensity units.

FIGS. 6A-6D are graphs showing a reflected intensity trace of the metal layer as a function of distance using the average, minimum, maximum, and differential intensity measurements.

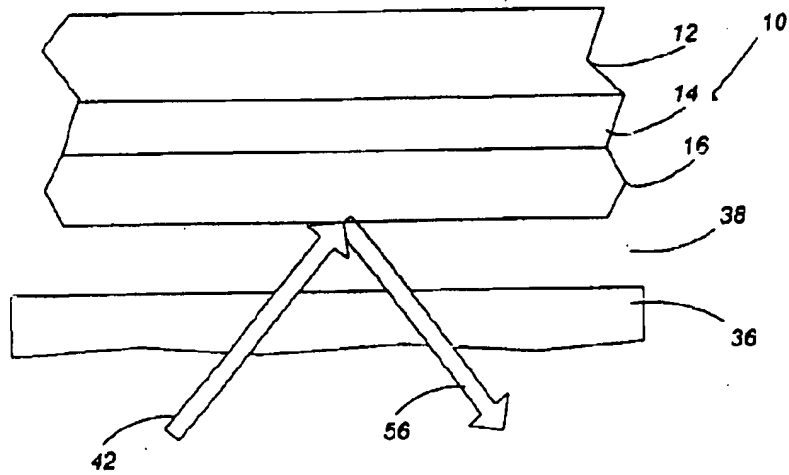
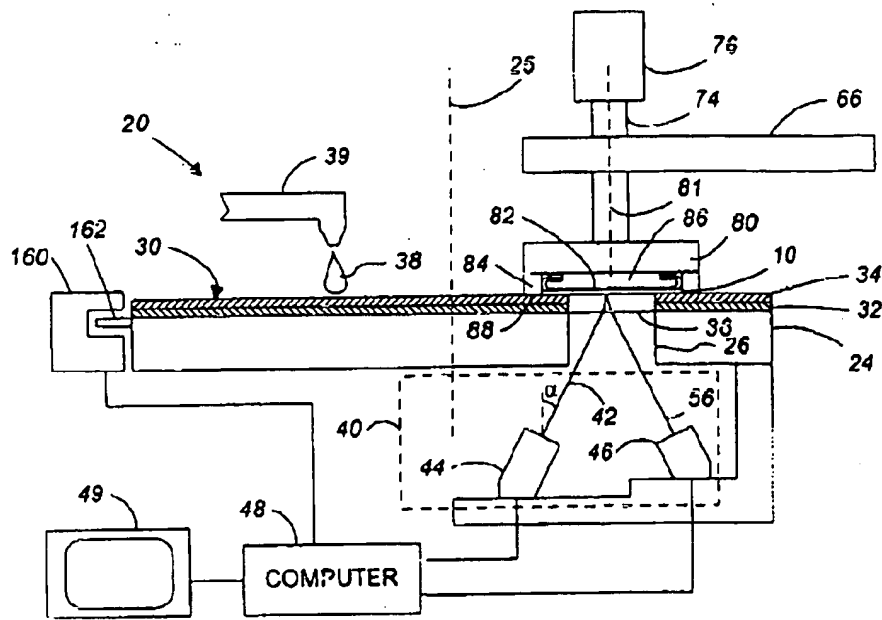
FIG. 7 is a schematic view illustrating the radial positions of the intensity measurements on the substrate.

FIG. 8A is a flow chart of a method of determining the radial position of a sampling zone.

FIG. 8B is a graph showing the time at which the laser beam passes beneath the leading and trailing edges of the substrate as a function of the number of rotations of the platen.

FIG. 9 is a schematic view illustrating the calculation of the radial positions of the intensity measurements.

FIG. 10 is a schematic diagram of a data structure to store intensity measurements.



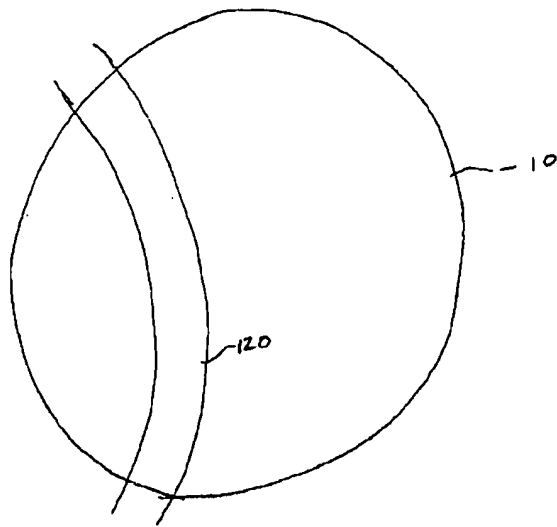


FIG. 4

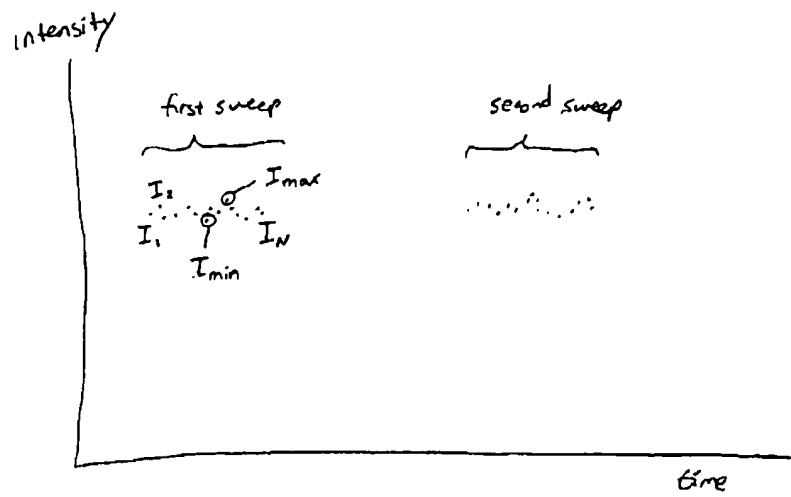


FIG. 5

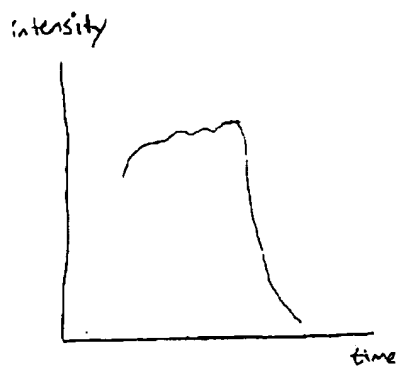


FIG. 6A

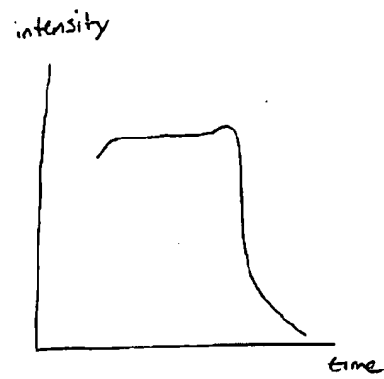


FIG. 6B

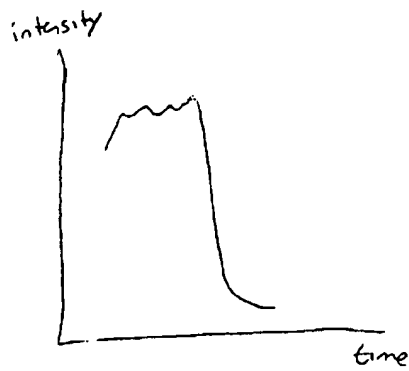


FIG. 6C

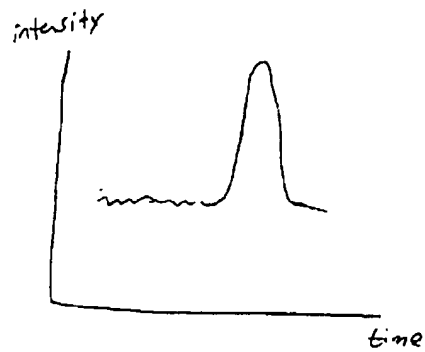
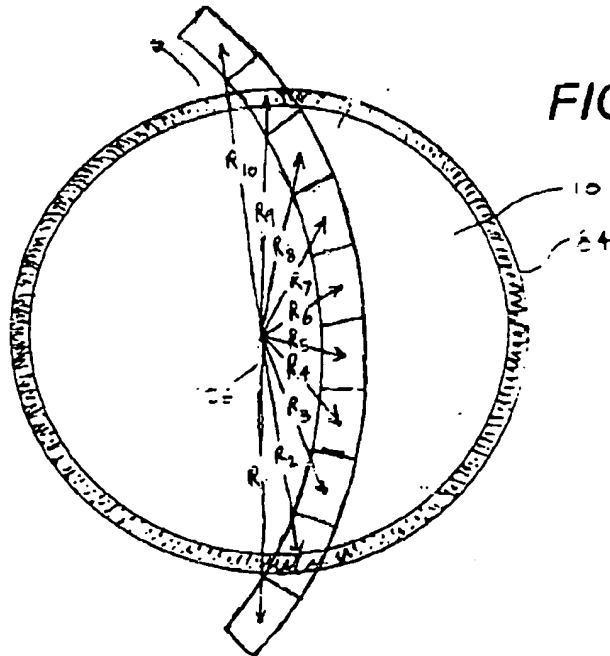


FIG. 6D



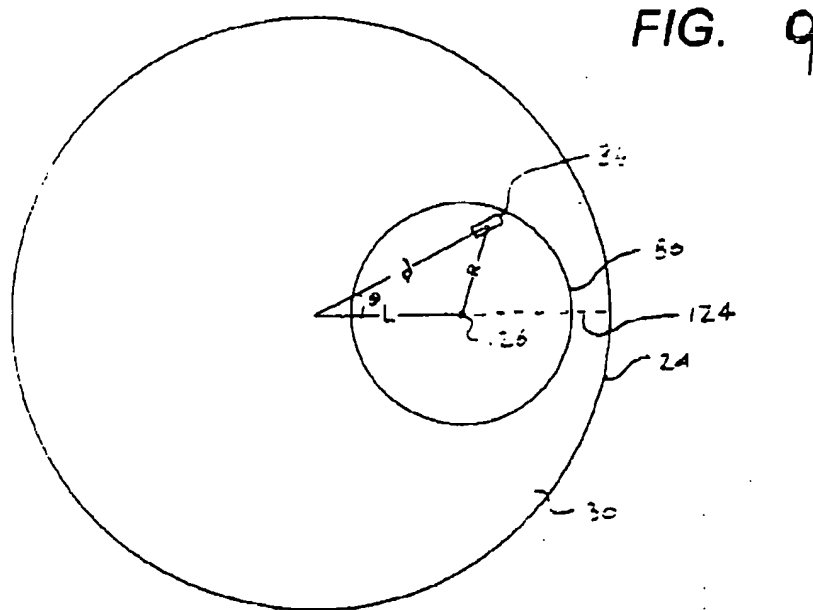
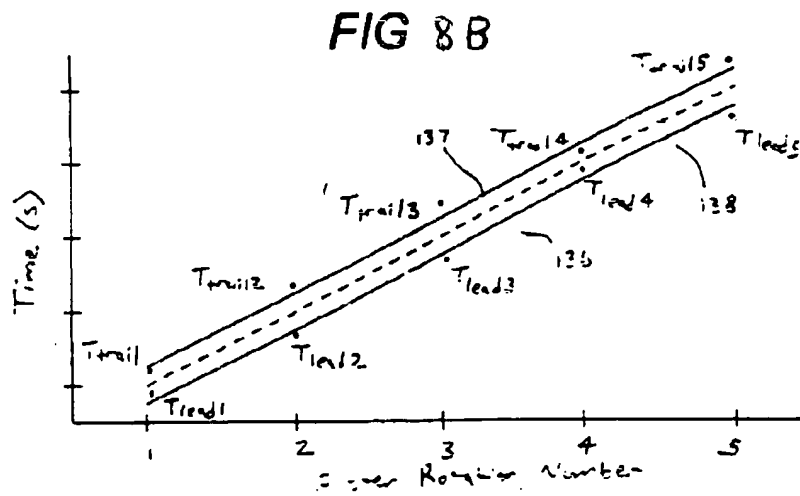
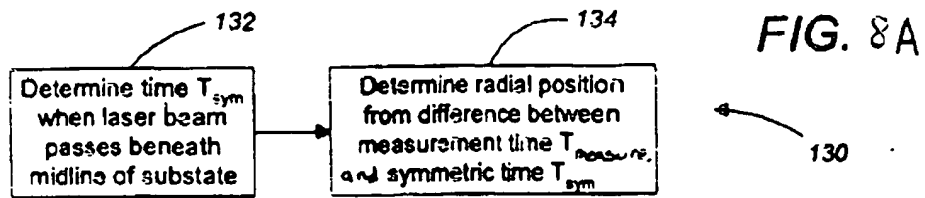


FIG. 10

140

142	θ_{in1}	I_1 t_1	I_{15} t_{15}	I_{24} t_{24}	...
144	θ_{in2}	I_2 t_2	I_{17} t_{17}	I_{19} t_{19}
	θ_{in3}	I_3 t_3	I_{12} t_{12}		

1 Abstract

An apparatus, as well as a method, brings a surface of a substrate into contact with a polishing pad that has a window, causes relative motion between the substrate and the polishing pad, and directs a light beam through the window so that the motion of the polishing pad relative to the substrate causes the light beam to move in a path across the substrate. An extreme intensity measurement is derived from a plurality of intensity measurements made as the light beam moves across the substrate. The beam sweeps across the substrate a plurality of times to generate a plurality of extreme intensity measurements, and a polishing endpoint is detected based on the plurality of extreme intensity measurements.

2 Representative Drawing Fig. 2

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-284300
(P2001-284300A)

(43) 公開日 平成13年10月12日 (2001. 10. 12)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	キーワード* (参考)
H 0 1 L 21/304	6 2 2	H 0 1 L 21/304	6 2 2 S 6 2 2 D 6 2 2 F 6 2 2 R 6 2 2 X

審査請求 未請求 請求項の数27 O L 外国語出願 (全 37 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-379019 (P2000-379019)

(22) 出願日 平成12年12月13日 (2000. 12. 13)

(31) 優先権主張番号 0 9 / 4 6 0 5 2 9

(32) 優先日 平成11年12月13日 (1999. 12. 13)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390040660
アプライド マテリアルズ インコーポレ
イテッド
APPLIED MATERIALS, I
NCORPORATED
アメリカ合衆国 カリフォルニア州
95054 サンタ クララ パウアーズ ア
ベニュー 3050

(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹 (外1名)

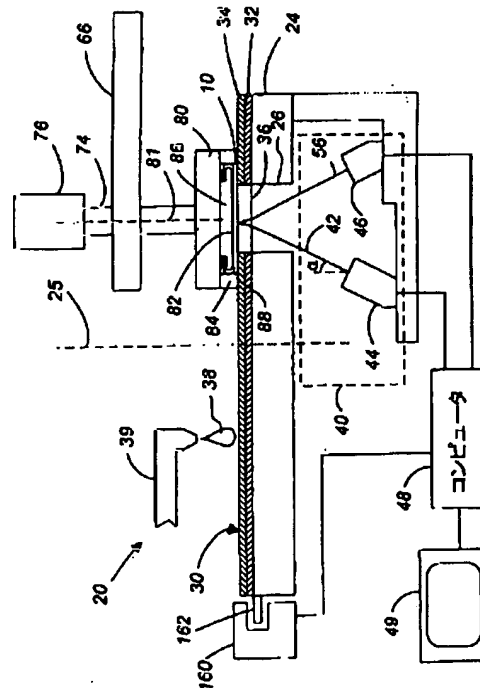
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学監視を用いた研磨終点検出方法および装置

(57) 【要約】

【課題】 適切な終点を判定する方法及び装置を提供する。

【解決手段】 装置並びに方法は、基板表面を窓部を有する研磨パッドに接触させ、基板と研磨パッドとの間に相対運動を生じさせ、基板に対する研磨パッドの運動が光線に基板を横切る径路内を移動させる様に、窓部を介して光線を向ける。光線が基板を横切って移動する際に生成する複数の発光強度測定値から、極限発光強度測定値を導出する。光線は、複数回数、基板を横切って掃引して、複数の極限発光強度測定値を生成し、複数の極限発光強度測定値に基づいて、研磨終点が検出される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 化学機械研磨の終点検出方法であって、
a) 基板表面を研磨パッドに接触させるステップと、
b) 基板と研磨パッドとの間に相対運動を生じさせるステップと、
c) 基板表面に接触させるよう光線を向けるステップと、
d) 基板表面を横切る経路内で光線を移動させるステップと、
e) 基板から反射する光線により生成された発光強度信号を監視するステップと、
f) 光線が基板を横切って移動する際に発光強度信号から複数の発光強度測定値を抽出するステップと、
g) 複数の発光強度測定値から第一の極限発光強度測定値を選択するステップと、
h) 基板を横切る光線の複数の掃引に対してステップc)乃至ステップg)を繰り返して、第一の複数の極限発光強度測定値を生成するステップと、
i) 第一の複数の極限発光強度測定値に基づいて、研磨終点を検出するステップとを含む方法。

【請求項2】 第一の極限発光強度測定値が、複数の発光強度測定値からの最大発光強度測定値である請求項1に記載の方法。

【請求項3】 第一の極限発光強度測定値が、複数の発光強度測定値からの最小発光強度測定値である請求項1に記載の方法。

【請求項4】 更に、複数の発光強度測定値から第二の極限発光強度測定値を選択するステップを含む請求項1に記載の方法。

【請求項5】 第一の極限発光強度測定値が最大発光強度測定値で、第二の極限発光強度測定値が複数の発光強度測定値からの最小発光強度測定値である請求項4に記載の方法。

【請求項6】 研磨終点の検出が、繰り返し毎の最小発光強度測定値をその繰り返しからの最大発光強度測定値から減じて、複数の差分発光強度測定値を生成するステップを含む請求項5に記載の方法。

【請求項7】 研磨終点の検出が、第一又は第二の複数の極限発光強度測定値のいずれかに係る基準を満足させるかどうかを判定するステップを含む請求項4に記載の方法。

【請求項8】 研磨終点の検出が、第一及び第二の複数の極限発光強度測定値の双方に係る基準を満足させるかどうかを判定するステップを含む請求項4に記載の方法。

【請求項9】 基板が、ストップ層の上に形成されて研磨パッドに当接する充填層を含む請求項1に記載の方法。

【請求項10】 研磨終点が、ストップ層が少なくとも部分的に露出されていることを示す請求項9に記載の方

法。

【請求項11】 充填層が金属層で、ストップ層が誘電体層である請求項10に記載の方法。

【請求項12】 第一の極限発光強度測定値が、複数の発光強度測定値からの最小発光強度測定値である請求項11に記載の方法。

【請求項13】 研磨終点が、ストップ層が実質的に露出していることを示す請求項9に記載の方法。

【請求項14】 充填層が金属層で、ストップ層が誘電体層である請求項13に記載の方法。

【請求項15】 第一の極限発光強度測定値が、複数の発光強度測定値からの最大発光強度測定値である請求項14に記載の方法。

【請求項16】 更に、繰り返し毎に複数の発光強度測定値から平均発光強度を計算するステップを含む請求項14に記載の方法。

【請求項17】 研磨終点が、平均発光強度測定値に基づく請求項16に記載の方法。

【請求項18】 研磨パッドが窓部を含み、光線が窓部を介して方向付けされ、基板に対する研磨パッドの運動が光線を基板表面を横切って移動させる請求項1に記載の方法。

【請求項19】 研磨パッドが回転して、基板と研磨パッドとの間に相対運動を生成する請求項18に記載の方法。

【請求項20】 更に、各発光強度測定値の半径方向位置を判定するステップと、半径方向位置に基づいて、発光強度測定値を複数の半径方向範囲に分割するステップと、複数の半径方向範囲の各々における発光強度測定値から極限発光強度測定値を選択するステップとを含む請求項1に記載の方法。

【請求項21】 更に、研磨終点で研磨を停止するステップを含む請求項1に記載の方法。

【請求項22】 更に、研磨終点で研磨パラメータを変更するステップを含む請求項1に記載の方法。

【請求項23】 研磨パラメータが、研磨消耗品である請求項22に記載の方法。

【請求項24】 研磨消耗品が、スラリである請求項23に記載の方法。

【請求項25】 スラリが、高選択性スラリから低選択性スラリへ変更される請求項24に記載の方法。

【請求項26】 化学機械研磨の研磨制御方法であって、
a) 基板表面を研磨パッドに接触させるステップと、
b) 基板と研磨パッドとの間に相対運動を生じさせるステップと、
c) 基板表面に接触させるよう光線を向けるステップと、

- d) 基板表面を横切る経路内で光線を移動させるステップと、
- e) 基板から反射する光線により生成された発光強度信号を監視するステップと、
- f) 光線が基板を横切って移動する際に発光強度信号から複数の発光強度測定値を抽出するステップと、
- g) 複数の発光強度測定値から最小発光強度測定値を選択するステップと、
- h) 複数の発光強度測定値から最大発光強度測定値を選択するステップと、
- i) 基板を横切る光線の複数の掃引に対してステップc)乃至ステップh)を繰り返し、複数の最小発光強度測定値と複数の最大発光強度測定値とを生成するステップと、
- j) 複数の最小発光強度測定値に基づいて、第一の研磨終点を検出するステップと、
- k) 複数の最大発光強度測定値に基づいて、第二の研磨終点を検出するステップとを含む方法。

【請求項27】 化学機械研磨の終点検出方法であって、

- a) 基板表面を研磨パッドに接触させるステップと、
- b) 基板と研磨パッドとの間に相対運動を生じさせるステップと、
- c) 基板表面に接触させるよう光線を向けるステップと、
- d) 基板表面を横切る経路内で光線を移動させるステップと、
- e) 基板から反射する光線により生成された発光強度信号を監視するステップと、
- f) 光線が基板を横切って移動する際に発光強度信号から複数の発光強度測定値を抽出するステップと、
- g) 発光強度測定値毎に半径方向位置を判定するステップと、
- h) 半径方向位置に基づいて、発光強度測定値を複数の半径方向範囲に分割するステップと、
- i) 複数の半径方向範囲の各々における発光強度測定値から極限発光強度測定値を選択するステップと、
- j) 基板を横切る光線の複数の掃引に対してステップc)乃至ステップi)を繰り返して、複数の半径方向範囲の各々における複数の極限発光強度測定値を生成するステップと、
- k) 複数の半径方向範囲の複数の極限発光強度測定値に基づいて、研磨終点を検出するステップとを含む方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の背景】本発明は基板の化学機械研磨に関し、特に、化学機械研磨作業中に終点を検出する方法および装置に関する。

【0002】集積回路は、典型的には、シリコンウェハ上に導電性、半導性又は絶縁性の層を順次形成すること

により、基板上に形成される。ある製造ステップでは、パターン付けされたストップ層上に充填層を形成して、ストップ層が露出するまで充填層を平坦化することが必要となる。例えば、導電性充填層をパターン付けされた絶縁性ストップ層上に形成して、ストップ層内のトレンチ又は孔を充填する。平坦化の後、高くなった絶縁層のパターンの間に残っている導電層の部分が、バイア、プラグ及び基板上の薄膜回路の間の導電性経路になるラインを形成する。

【0003】化学機械研磨(CMP)は、一般に容認された平坦化方法の一つである。この平坦化方法は、典型的には、基板をキャリア又は研磨ヘッドに取り付けることを必要とする。基板の露出表面を、回転研磨ディスクパッド又はベルトパッドに載置する。研磨パッドは、「標準」パッド又は固定研磨パッドのいずれかとして行うことができる。標準パッドは、耐久性のある粗い表面を有し、一方、固定研磨パッドは、格納媒体に保持された研磨粒子を有している。キャリアヘッドは、制御可能な負荷、即ち、圧力を基板に与えて、研磨パッドに対して基板を押し付ける。標準パッドを用いる場合には、少なくとも一つの化学反応剤と研磨粒子とを含む研磨スラリーを研磨パッドの表面に供給する。

【0004】CMPにおける問題の一つは、研磨工程が完結しているかどうかを判断すること、即ち、基板の層が所望の平坦さ又は厚さまで平坦化されたかどうかを判断することである。基板層の初めの厚さ、スラリーの組成、研磨パッドの状態、研磨パッドと基板との間の相対速度及び基板に加えられる負荷における変動が、材料除去率の変動の原因となる。これらの変動が、研磨終点に達するのに必要な時間変動の原因となる。従って、単に研磨時間の関数として研磨終点を判定することはできない。

【0005】研磨終点を判定する方法の一つは、研磨表面から基板を除去してそれを調べることである。例えば、基板を計測ステーションに送り、例えば、プロファイロメーター又は抵抗率測定値で基板の層の厚さを測定する。所望の仕様を満たさない場合には、基板をCMP装置に再ロードしてさらに処理する。これは、時間のかかる手順で、CMP装置のスループットを低下させる。また、検査により、材料が過剰に除去されたことがわかると、基板は使用できなくなることがある。

【0006】より最近になって、研磨終点を検出するために、例えば、干渉計又は反射率計を用いて、基板のインサイチュー(in-situ)光学監視が行われるようになってきた。例えば、金属層を研磨して、下層にある絶縁層又は誘電体層を露出する場合に、金属層が除去されると基板の反射率が突然下がる。この低下を検出して、研磨終点を知らせることができる。残念ながら、反射率が急激な変化がある場合でも、適切な終点を判定することは困難である。

【0007】

【発明の概要】一態様において本発明は、化学機械研磨用の終点検出方法に向けられている。この方法においては、基板表面を研磨パッドと接触させて、基板と研磨パッドとの間に相対運動を生成する。光線を向けて基板表面に当て、光線を基板表面を横切る経路で移動させる。基板から反射した光線により生成された発光強度信号を監視して、光線が基板を横切って移動する時の複数の発光強度測定値を発光強度信号から抽出する。第一の極限発光強度測定値を、複数の発光強度測定値から導出する。基板を横切る複数の掃引光線を繰り返して、第一の複数の極限発光強度測定値を生成して、第一の複数の極限発光強度測定値に基づいて研磨終点を検出する。

【0008】本発明の実施形態は、次の特徴を含む。第一の極限発光強度測定値は、複数の発光強度測定値からの最大及び最小発光強度測定値である。第二の極限発光強度測定値を、複数の発光強度測定値から選択することもできる。各繰り返しの最小発光強度測定値を、その繰り返しからの最大発光強度測定値から減じて、複数の差分発光強度測定値を生成する。研磨終点を検出することには、第一又は第二の複数の極限発光強度測定値のいずれかに伴う基準を満たすかどうかを判定することが含まれる。また、研磨終点を検出することには、第一及び第二の複数の極限発光強度測定値の両方に伴う基準を満たすかどうかを判定することが含まれる。基板は、誘電体層等のストップ層の上に形成される、金属層等の充填層を含み、充填層が研磨パッドと接している。研磨終点が示すことは、ストップ層が少なくとも部分的に露出しているか、もしくは、ストップ層が実質的に露出しているかについてである。各繰り返しの複数の発光強度測定値から平均発光強度を計算するので、研磨終点は平均発光強度測定値に基づいている。研磨パッドは窓部を含み、この窓部を介して光線を向けて、基板に対する研磨パッドの運動が、光線を基板表面を横切って移動させる。各発光強度測定値の放射状の位置を判定する。発光強度測定値を、半径方向位置に基づく複数の半径方向範囲に分割する。極限発光強度測定値を、複数の半径方向範囲の各々における発光強度測定値から選択する。研磨を研磨終点で停止するか、もしくは、例えば、スラリ等の研磨消耗品等の研磨パラメータを研磨終点で変更する。

【0009】本発明の利点には、一以上の次の点が含まれる。より広い範囲の終点検出アルゴリズムが利用でき、より広い範囲の研磨手順で光学監視システムを有効にする。終点検出手順は、より頑強で、しかも失敗する可能性がより少ない。金属研磨中の終点検出を向上させる。下層の酸化層を最初に露出する場合には、研磨手順、研磨速度、化学的性質及びスラリ組成を変更することもできるし、酸化層及び障壁層全体を除去した時に、研磨をより正確に停止することもできる。

【0010】本発明の他の特徴及び利点について、図面

及び特許請求の範囲を含む以下の図面により明らかになるであろう。

【0011】

【発明の詳細な記載】図1及び図2を参照すると、CMP装置20により一枚以上の基板10を研磨してもよい。同様の研磨装置20については、米国特許第5,738,574号に記載されており、装置全体の開示については、ここに引用して組み入れる。研磨装置20は、一連の研磨ステーション22と移載ステーション23とを含む。移載ステーション23は、キャリアヘッドとローディング装置との間で基板を移送する。

【0012】各研磨ステーションは、研磨パッド30を載置している回転プラテン24を含む。第一及び第二のステーションは、硬い、耐久性のある外側表面を有する二層研磨パッド又は研磨粒子を包埋した固定研磨パッドを含む。最終研磨ステーションは、比較的柔軟なパッドを含んでもよい。また、各研磨ステーションはパッド修正装置28を含んでもよく、基板を効果的に研磨するように研磨パッドの状態を維持する。

【0013】二層研磨パッド30は、典型的には、プラテン24の表面と接するバックング層32と、基板10を研磨するために用いられる被覆層34とを含む。被覆層34は、典型的には、バックング層32よりも硬い。しかしながら、パッドのいくつかは被覆層のみを有し、バックング層は全く持たない。被覆層34は、ポリウレタン製の開放セル発泡体又は溝が施された表面を有するポリウレタン製のシートから成る。バックング層32は、ウレタンに浸出した圧縮フェルト繊維から成る。IC-1000から成る被覆層とSUBA-4から成るバックング層を有する二層研磨パッドは、デラウェア州ニューアーク市ローデル・インコーポレーテッド社から市販されている(IC-1000及びSUBA-4は、ローデル・インコーポレーテッド社の製品名である)。

【0014】回転マルチヘッドカルーセル60は、中央ポスト62により支持され、カルーセルモータ組立体(図示せず)により、組立体上でカルーセル軸線64の周囲を回転する。中央ポスト62は、カルーセル支持プレート66とカバー68とを支持する。カルーセル60は、四つのキャリアヘッドシステム70を含む。中央ポスト62は、カルーセルモータに回転カルーセル支持プレート66を回転させて、キャリアヘッドシステムとそれに取り付けられている基板とをカルーセル軸線64の周囲で軌道を描いて回転させる。キャリアヘッドシステムのうちの三つは、基板を受け取って保持し、研磨パッドに基板を押し付けることにより、基板を研磨する。その間、キャリアヘッドシステムのうちの一つは、ステーション23から基板を受け取り、そして、基板を送ってステーション23に移送する。

【0015】各キャリアヘッドシステムは、キャリア又はキャリアヘッド80を一つ含む。キャリア駆動軸74

は、キャリアヘッド回転モータ76（カバー68の四分の一を取り除くことにより図示されている）を各キャリアヘッド80に接続するので、各キャリアヘッドは、キャリアヘッド自体の軸線周囲を独立して回転することができる。また、各キャリアヘッド80は、カルーセル支持プレート66内に形成されている放射状スロット72内を独立して横方向に往復する。

【0016】キャリアヘッド80は、機械的機能をいくつか実行する。概して、キャリアヘッドは、研磨パッドに対して基板を保持し、基板の裏側表面全体に下向きの圧力をかけて、駆動軸から基板ハトルクを伝送し、研磨作業中に基板がキャリアヘッドの下から滑って外れないようにする。

【0017】キャリアヘッド80は、基板10の取り付け表面になる可撓膜82と、取り付け表面下の基板を保持する保持リング84とを含む。可撓膜82により形成される処理室86の加圧が、研磨パッドに基板を強制的に押し付ける。保持リング84を、非常に反射性のある材料で形成することもできるし、もしくは、反射層で被覆して反射下部表面88とすることもできる。類似のキャリアヘッド80については、1997年5月21日出願の米国特許出願第08/861,260号に記載されており、その開示はすべてここに引用して組み入れる。

【0018】スラリー供給口又は複合スラリー/リンサーーム39により、研磨パッド30の表面に、反応剤（例えば、酸化研磨用脱イオン水）と化学反応触媒（例えば、酸化研磨用水酸化カリウム）とを含むスラリー38を供給することもできる。研磨パッド30が標準パッドの場合には、スラリー38に研磨粒子（例えば、酸化研磨用二酸化ケイ素）を含めることもできる。

【0019】操作においては、プラテンをその中心軸線25周囲で回転させて、キャリアヘッドをヘッドの中心軸線81周囲で回転させて、研磨パッド表面の端から端まで横方向に水平移動させる。

【0020】孔26をプラテン24内に形成して、孔の上を覆う研磨パッド30の一部分に透明窓部36を形成する。透明窓部36は、1996年8月26日出願の米国特許出願第08/689,930号に記載されているように構成することもでき、開示の全体についてはここに引用して組み入れる。孔26及び透明窓部36は、キャリアヘッドの並進位置にかかわらず、プラテンの部分が回転する間、基板10が見えるように配置されている。

【0021】反射率計又は干渉計として機能することができる光学監視システム40は、概して、孔26の下に配置されているプラテン24にしっかり取り付けられて、プラテンとともに回転する。光学監視システムは、光源44と検出器46とを含む。光源は光線42を生成し、光線は、透明窓部36とスラリー38とを通過して伝搬し（図3を参照のこと）、基板10の露出している表

面に衝突する。例えば、光源44は、レーザであってもよく、光線42は、コリメートレーザビームであってもよい。光レーザビーム42を、基板10の表面に垂直な軸線から α の角度でレーザ44から投影することができる。即ち、軸線25及び81から α の角度である。また、孔26及び窓部36とが延長している場合には、ビーム拡大器（図示せず）を光線の経路内に配置して、窓部の延長軸線に沿って光線を拡大することもできる。レーザ44は、連続して動作することもできる。また、レーザを作動して、孔26が概ね基板10に隣接している間、レーザビーム42を生成することもできる。

【0022】CMP装置20は、窓部36が基板の近傍にある場合に感知する、光学断続器等の位置センサ160を含んでもよい。例えば、光学断続器を、キャリアヘッド80の反対の固定点に取り付けることもできる。フラグ162を、プラテンの外周に取り付ける。窓部36が基板10の下を掃引する間、フラグがセンサ160の光学信号に割り込む様に、取り付け点及びフラグ162の長さを選択する。

【0023】操作において、CMP装置20は、光学監視システム40を用いて、基板表面から除去された材料の量を判定したり、もしくは、いつ表面が平坦になったかを判定したりする。汎用のプログラム可能なデジタルコンピュータ48を、レーザ44、検出器46及びセンサ160に接続することもできる。コンピュータ48をプログラムして、基板が概ね窓部の上に重なる時にレーザを作動させて、検出器からの発光強度測定値を保存して、発光強度測定値を出力装置49に表示して、発光強度測定値を保存し、発光強度測定値を半径方向範囲に分類して、終点検出論理を測定した信号に当てはめて研磨終点を検出してもよい。

【0024】図3を参照すると、基板10は、シリコンウェハ12と、酸化又は窒化層14の上に形成された、上に重なる金属層16とを含む。金属は、銅、タングステン、アルミニウム、その他の金属とすることができる。異なる反射率を有する基板の異なる部分を研磨する際に、検出器46からの信号出力は時間で変化する。特に、金属層16が研磨されて酸化又は窒化層14を露出する時に、基板の反射率が下る。検出器46の時間可変出力について、インサイチュー反射率測定値トレース（あるいはもっと簡単に、反射率トレース）と呼ぶことにする。以下で説明されるように、この反射率トレースを用いて、金属層研磨作業の終点を判定してもよい。

【0025】基板10上の異なる半径方向位置を研磨する間に、概して、反射した発光強度はさまざまな変化を受ける。これは、基板のさまざまな位置で、異なる速度で金属層が除去されるからである。例えば、基板中央付近の金属層が最後に除去されて、一方、基板の周辺又は端縁が初めに除去されたり、もしくはこの逆の場合がある。しかしながら、光学監視システムでは、ウェハ全体から

の反射データを、ミリセカンドといった比較的細かい時間スケールで捕らえるので、研磨終点の判定に有用である。

【0026】図4を参照すると、プラテンの複合回転とキャリアヘッドの直線的な掃引とにより、窓部36（及びレーザビーム42）に掃引経路120内のキャリアヘッド80の底部表面と基板10とを横切って掃引させる。図5を参照すると、レーザビームが基板を横切って掃引する際に、光学監視システム40は、一連の発光強度測定値 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$ （数字Nは、掃引ごとに異なることが可能である）を生成する。光学監視システム40のサンプル速度F（発光強度測定値を生成する速度）は、約500乃至2000ヘルツ（Hz）か、さらに大きく、約0.5乃至2ミリ秒の間のサンプリング時間に対応する。各時間ごとに窓部は基板の下を掃引し、コンピュータ48が一連の発光強度測定値 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$ から値を抽出する。例えば、一連の発光強度測定値を平均して、平均発光強度 I_{MEAN} を生成することができる。また、コンピュータが、一連の測定値から最小発光強度 I_{MIN} 又は最大発光強度 I_{MAX} を抽出することができる。また、コンピュータが、最大及び最小発光強度の間の差、即ち、 $I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}$ に等しい発光強度差分 I_{DIF} を生成することができる。

【0027】コンピュータ48により抽出された、一連の掃引に対する一連の値を、メモリ又は不揮発性記憶装置に保存することができる。図6A乃至図6Dを参照すると、この一連の抽出された値（掃引一つ当たり一つの抽出値）を集めて測定時間関数として表示し、基板の反射率の時間可変トレースを提供する。この時間可変トレースはまた、フィルタをかけてノイズを除去されてもよい。図6Aは、各掃引の平均発光強度 I_{MEAN} から生成された反射率トレースを示し、図6Bは、各掃引の最大発光強度 I_{MAX} から生成された反射率トレースを示している。図6Cは、各掃引の最小発光強度 I_{MIN} から生成された反射率トレースを示し、図6Dは、各掃引の発光強度差分 I_{DIF} から生成された反射率トレースを示している。

【0028】最小、最大及び平均発光強度トレースの全体的な形について、以下に説明する。まず、下層のパターン層14の位相により、金属層16は、初めから位相をいくつか有している。この位相のため、光線が金属層に当たる際に光線が分散する。研磨作業が進行するにつれて、金属層はより平坦になり、研磨された金属層の反射率は増加する。金属層の大半が除去されると、発光強度は比較的安定する。一旦、酸化層が露出し始めると、研磨作業が完了するまで、全体的な信号発光強度は低下する。最小、最大及び平均発光強度トレースの全体的な形は類似しているが、異なるトレースが異なる形を有しているのは、異なる手順を用いて基礎となる発光強度測定値からトレースのデータ点を抽出していたからであ

る。

【0029】最大発光強度トレース、最小発光強度トレース及び差分発光強度トレースは、金属研磨中の終点分析に、特に有用である。特に、最小発光強度トレースは、酸化層が露出し始めるやいなや、低下し始める傾向がある。対照的に、最大発光強度トレースは、金属層がほとんど完全に除去されて、酸化層が完全に露出されると、即ち、最小発光強度トレースが低下し始めると、すぐに低下し始める傾向がある。従って、最小発光強度トレースを、酸化層上のスポットが最初に除去されたかどうか検出することに用いることができ、最大発光強度トレースを、金属層が完全に除去されたかどうか検出することに用いることができる。平均発光強度トレースは、最小及び最大発光強度トレースの間のいずれかになる。差分発光強度トレースは、金属層が除去されて下層の酸化層が完全ではないがある程度露出された時に最大になるので、差分発光強度トレースは基板の不均一性のある尺度になる。

【0030】四つの発光強度トレースがあれば、いろいろな種類の終点検出アルゴリズムを実行することができる。別々の終点基準（例えば、局所的最小値又は最大値、スロープあるいは閾値に基づいて）を、各形式のトレース用に生成することができる。次に、各種トレース用の終点検出条件を、ブール論理と結合させることができる。例えば、最大発光強度トレース用の終点条件あるいは、差分発光強度トレース用の終点条件のいずれかを満足させる場合に研磨を停止することもできる。もう一つの例では、最小発光強度トレース用の終点条件及び平均発光強度トレース用の終点条件の両方を満足させる場合のみに研磨を停止させることもできる。重要なことは、二つ以上のトレースの終点基準の組み合わせは、いずれの組み合わせも可能である。

【0031】また、異なる終点トレースを用いて、異なる研磨イベントをトリガすることもできる。最小発光強度トレースを用いて、研磨パラメータの変更をトリガさせることもできる。例えば、下層の酸化層を最初に露出する際に、研磨圧力、研磨速度、化学的性質及びスラリー組成を変更することもできる。特に、ディッシングを避けるために、高い選択性から低い選択性へとシステムを変更することもできる。最大発光強度信号は、金属層が完全に除去された時にただ一度だけ発生するので、最大発光強度信号での終点検出に基づいて、研磨を停止することもできる。

【0032】また、平均、最小、最大及び差分発光強度トレースを、基板上の複数の半径方向範囲用に生成することもできる。複数の半径方向範囲の発光強度トレースの生成については、1998年11月2日出願の米国特許出願第09,184,767号に開示されており、全体を引用して組み入れる。前に述べているが、プラテンの複合回転及びキャリアヘッドの直線的な掃引が、窓部

36 (及びレーザービーム42)に掃引経路120内のキャリアヘッド80の底部表面及び基板10の端から端まで掃引させる。図7に移ると、対応する発光強度測定値 I_1, I_2, \dots, I_N の半径方向位置 R_1, R_2, \dots, R_N を判定することができる。ある発光強度測定値の半径方向位置を判定する方法の一つは、測定時間、プラテン回転速度及びキャリアヘッド掃引プロフィールに基づいて、基板下のレーザーの位置を算出することである。残念なことに、実際のプラテン回転速度及びキャリアヘッド掃引プロフィールは、研磨パラメータと正確に一致しないことがある。従って、発光強度測定値の半径方向位置を判定する好適な方法130について、図8Aに図示する。まず、基板の中線124 (図5Cを参照のこと)の下を通過するレーザービーム42の時間 T_{sym} を判定する (ステップ132)。次に、測定時間 $T_{measure}$ 及び対称時間 T_{sym} の間の時間差から、発光強度測定値の半径方向位置を判定する (ステップ134)。

【0033】対称時間 T_{sym} を判定する方法の一つは、これらの発光強度測定値が基板端縁に対応する場合に、各掃引から最初及び最後の大きい発光強度測定値の時間を平均することである。しかしながら、これが、 T_{sym} にある不確実性をもたらすことになるというのは、基板上の発光強度測定値の位置がわかっていないからである。

【0034】図8Bを参照すると、ステップ132で対称時間 T_{sym} を演算するために、コンピュータ48が、掃引経路120から最初及び最後の大きい発光強度測定値を判定し、対応する測定時間 T_{lead} 及び T_{trail} を保存する。これらのリード時間 T_{lead} 及びトレイル時間 T_{trail} を各掃引ごとに蓄積して、一連のリード時間 $T_{lead1}, T_{lead2}, \dots, T_{leadN}$ 及びトレイル時間 $T_{trail1}, T_{trail2}, \dots, T_{trailN}$ を生成する。コンピュータ48は、リード時間 $T_{lead1}, T_{lead2}, \dots, T_{leadN}$ 及び各リーディング発光強度測定値96の対応するプラテン回転数1、2、 \dots 、 N を保存する。同様に、コンピュータ48は、トレイル時間 $T_{trail1}, T_{trail2}, \dots, T_{trailN}$ 及び各トレイリング測定値の対応する回転数1、2、 \dots 、 N を保存する。プラテン24が実質的に一定の速度で回転すると仮定すると、リード時間 $T_{lead1}, T_{lead2}, \dots, T_{leadN}$ は、実質的に直線的に増加する関数 (実線136として図示) を形成する。同様に、トレイル時間 $T_{trail1}, T_{trail2}, \dots, T_{trailN}$ はまた、実質的に直線的に増加する関数 (実線137として図示) を形成する。コンピュータ48は、二つの最小平方フィットを実行して、二つの直線関数 $T_{lead}(n)$ と $T_{trail}(n)$ とを次のように生成する。

$$\begin{aligned} T_{lead}(n) &= a1 + (a2 * n) \\ T_{trail}(n) &= a3 + (a4 * n) \end{aligned}$$

ここで n は、プラテンの回転数で、 $a1, a2, a3$ 及

び $a4$ は、最小平方フィットの間に計算されたフィッティング関数である。一旦、フィッティング関数が計算されると、レーザービーム42が中線124 (点線138として図示) を横切る対称時間 T_{sym} を次のように計算する。

【0036】

【式1】

$$T_{sym} = \frac{a1+a3}{2} + \frac{a2+a4}{2} \cdot n$$

いくつかのプラテンの回転に対する最小平方フィットを用いて対称時間 T_{sym} を計算することにより、回転リングの下のスプリング域の相対位置における差により生じる不確実性を実質的に低減して、これにより、対称時間 T_{sym} の不確実性を著しく低減する。

【0037】一旦、レーザービームが中線124を横切る対称時間 T_{sym} 48を計算したならば、基板の中央126からの各発光強度測定値の半径方向位置 R_1, R_2, \dots, R_N をステップ132で計算する。図10を参照すると、半径方向位置を次のように計算する。

【0038】

【式2】

$$R = \sqrt{d^2 + L^2 - 2dL \cos \theta}$$

ここで d は、研磨パッドの中心と窓部36の中心との間の距離で、 L は、研磨パッドの中心から基板10の中心までの距離で、 θ は、窓部の角度位置である。窓部の角度位置 θ を、次のように計算する。

【0039】

【式3】

$$\theta = f_{platen} \cdot 2\pi(T_{measure} - T_{sym})$$

ここで f_{platen} は、プラテンの回転速度 (毎分回転数) である。キャリアヘッドが正弦波パターンで移動すると仮定すると、キャリアヘッドの直線位置 L を、次のように計算する。

【0040】

【式4】

$$L = L_0 + A \cdot \cos(\omega \cdot T_{measure})$$

ここで ω は、掃引周波数で、 A は掃引の大きさ、 L_0 はキャリアヘッド掃引の中心位置である。

【0041】もう一つの実施形態においては、位置センサ160を用いて、窓部が中線124を横切るときの時間 T_{sym} を計算することもできる。センサ160がキャリアヘッド80の反対に位置すると仮定すると、フラグ162は、透明窓部36を越えて対称的に位置することになる。コンピュータ48は、フラグがセンサの光学ビームを遮るトリガ時間 T_{start} と、フラグが光学ビームをクリアするトリガ時間 T_{end} とを共に保存する。時間 T_{sym} を、 T_{start} 及び T_{end} の平均として計算する。さらに別の実施形態においては、プラテン駆動モータと放射駆動モータ各々に接続された光学エンコーダから、各

測定時間でプラテン及びキャリアヘッドの位置を判定することもできる。

【0042】一旦、発光強度測定値の半径方向位置 R_1 、 R_2 、...、 R_N を計算したならば、発光強度測定値のいくつかは無視することもできる。ある発光強度測定値の半径方向位置 R が、基板の半径よりも大きい場合には、その発光強度測定値は、保持リングにより反射された放射、もしくは、窓部又はスラリからのバックグラウンド反射を含む。保持リングの下での発光強度測定値を、無視することができる。これにより、発光強度を反射した薄膜の計算に、スプリアス発光強度測定値を用いずにすむ。

【0043】基板の下でのレーザビーム掃引をいくつか行なった後に、コンピュータ48は、各々が測定時間 T_1 、 T_2 、...、 T_N 及び半径方向位置 R_1 、 R_2 、...、 R_N に対応する一組の発光強度測定値 I_1 、 I_2 、...、 I_N を蓄積する。図10を参照すると、発光強度、時間及び半径方向位置測定値を蓄積する際に、時間及び発光強度測定値を、データ構造140内のビンに保存する。各ビンは、基板上の半径方向範囲に対応している。例えば、基板の中心から20mmまでの発光強度測定値を最初のビン142に配置して、基板の中心から20mm及び30mmの間の発光強度測定値を第二のビン144に配置して、基板の中心から30mm及び40mmの間の発光強度測定値を第三のビン146に配置して、以下同様に配置する。ビンの正確な数とビンの半径方向範囲は、ユーザが抽出したい情報に基づく。概して、十分な数の発光強度測定値をビン内に蓄積して、視覚的に意味のある情報を提供するように、各ビンの半径方向範囲を選択することもできる。

【0044】一旦、発光強度測定値が半径方向範囲内に保存されたならば、発光強度の平均、最小、最大又は差分を判定する上述の計算を各ビンに対して実行し、これにより、基板表面を横切る各半径方向範囲の四つの形式の発光強度トレースを提供する。別々の終点基準（例えば、局所的最小値、最大値、スロープ又は閾値に基づく）を、各半径方向範囲内の各形式の発光強度トレース用に生成することができる。各種のトレース及び半径方向範囲の終点条件を、ブール論理と組み合わせることができる。例えば、いずれかの半径方向範囲の条件が満たされる場合にある終点をトリガすることもできるし、もしくは、複数の半径方向範囲の条件が満たされる場合のみに終点がトリガすることもできる。従って、さまざまな種類の終点検出アルゴリズムを実行することができ

る。

【0045】以上、本発明について、好適な実施形態に基づき説明してきた。しかしながら、本発明は図示され説明された実施形態に限定されるものではない。本発明の範囲は前記特許請求の範囲により画定される。

【図面の簡単な説明】

【図1】化学機械研磨装置を示す分解組み立て図である。

【図2】光学反射率計を含む化学機械研磨装置を示す側面図である。

【図3】基板に衝突・反射するレーザビームを概略で示している基板処理の簡単な断面図である。

【図4】キャリアヘッド下のレーザ経路を示す概略図である。

【図5】任意の発光強度単位における光学監視システムからの発光強度測定値を示す線図である。

【図6A】平均、最小、最大及び差分発光強度測定値を用いた距離関数としての金属層の反射発光強度トレースを示す線図である。

【図6B】平均、最小、最大及び差分発光強度測定値を用いた距離関数としての金属層の反射発光強度トレースを示す線図である。

【図6C】平均、最小、最大及び差分発光強度測定値を用いた距離関数としての金属層の反射発光強度トレースを示す線図である。

【図6D】平均、最小、最大及び差分発光強度測定値を用いた距離関数としての金属層の反射発光強度トレースを示す線図である。

【図7】基板上の発光強度測定値の半径方向位置を示す概略図である。

【図8A】サンプリング領域の半径方向位置を判定する方法を示すフローチャートである。

【図8B】プラテンの回転数関数として、立上がり及び立下がりの下部を通過するレーザビームの時間を示す線図である。

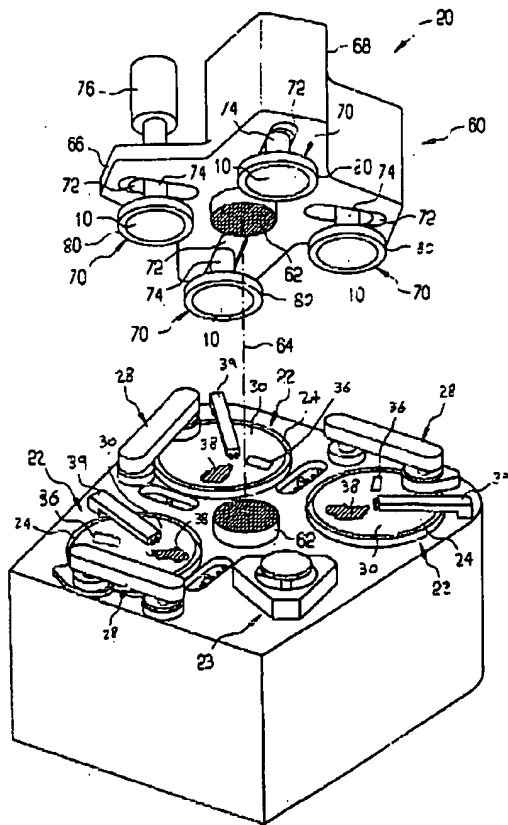
【図9】発光強度測定値の半径方向位置の計算を示す概略図である。

【図10】発光強度測定値を保存するデータ構成を示す概略図である。

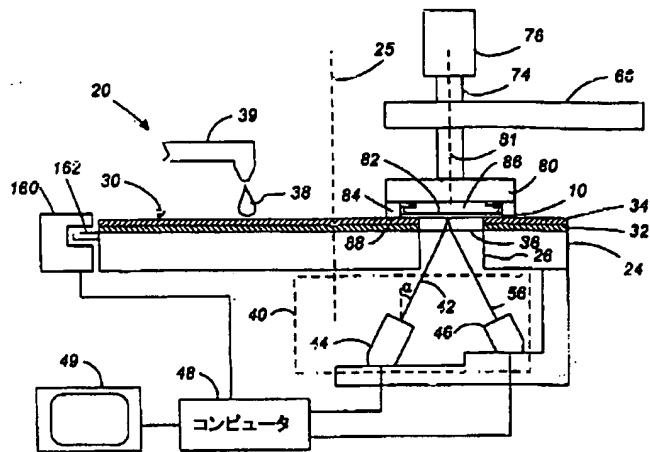
【符号の説明】

10…基板、20…研磨装置、22…研磨ステーション、23…移載ステーション、24…プラテン、30…研磨パッド、32…パッキング層、34…被覆層、60…マルチヘッドカラーセル、80…キャリアヘッド。

【図1】

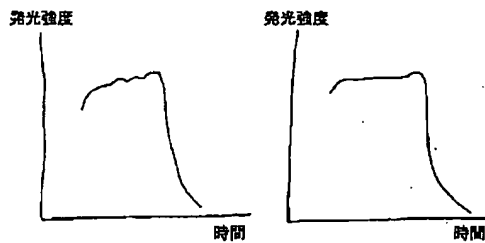


【図2】

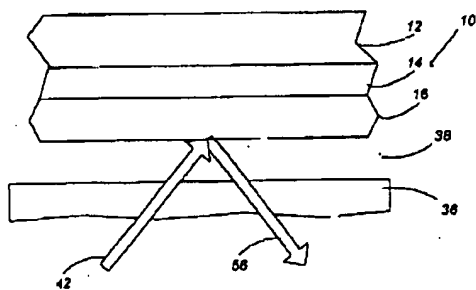


【図6A】

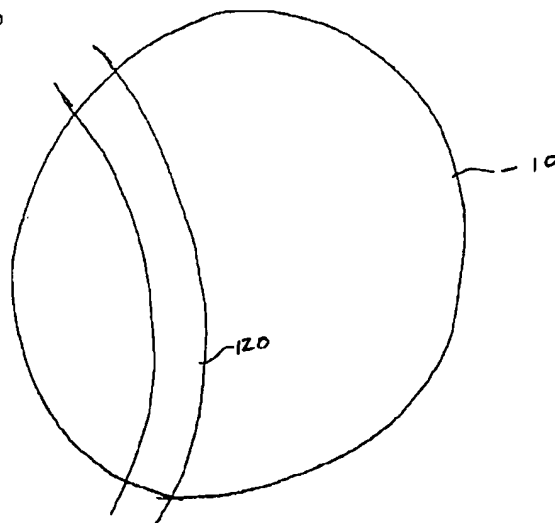
【図6B】



【図3】

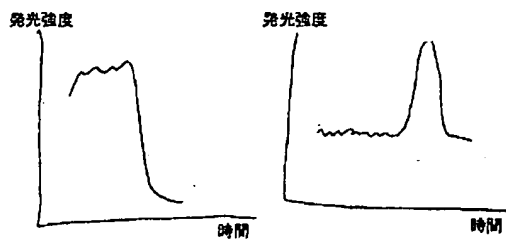


【図4】

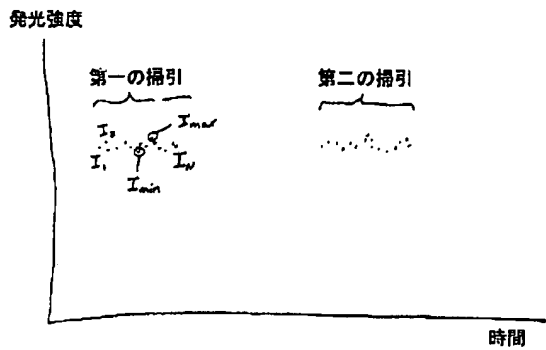


【図6C】

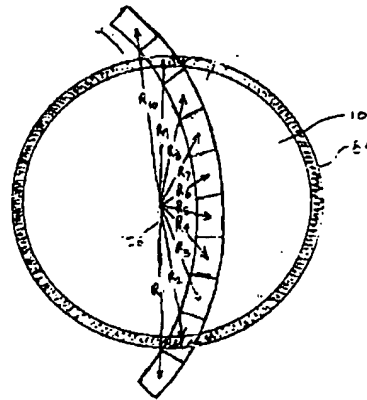
【図6D】



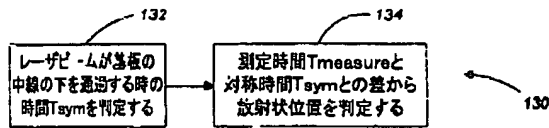
【図5】



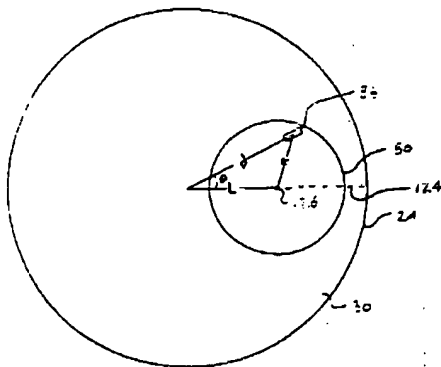
【図7】



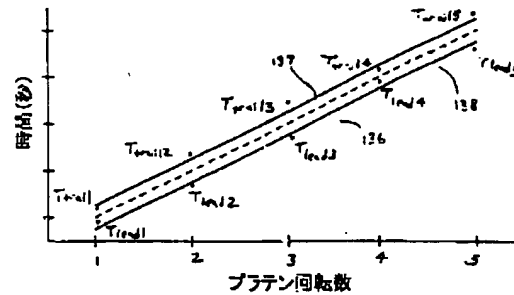
【図8A】



【図9】



【図8B】



【図10】

142	144	140				
		θ_{n1}	I_1	I_2	I_3	I_{24}
		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{24}	...
142	144	θ_{n2}	I_4	I_5	I_6	I_{11}
		ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_{11}	...
		θ_{n3}	I_7	I_8	I_9	I_{12}
142	144	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{12}	...
		θ_{n4}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{25}
		ϵ_{13}	ϵ_{14}	ϵ_{15}	ϵ_{25}	...
142	144	θ_{n5}	I_{16}	I_{17}	I_{18}	I_{26}
		ϵ_{16}	ϵ_{17}	ϵ_{18}	ϵ_{26}	...
		θ_{n6}	I_{19}	I_{20}	I_{21}	I_{27}
142	144	ϵ_{19}	ϵ_{20}	ϵ_{21}	ϵ_{27}	...
		θ_{n7}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	I_{28}
		ϵ_{22}	ϵ_{23}	ϵ_{24}	ϵ_{28}	...
142	144	θ_{n8}	I_{29}	I_{30}	I_{31}	I_{29}
		ϵ_{29}	ϵ_{30}	ϵ_{31}	ϵ_{29}	...
		θ_{n9}	I_{32}	I_{33}	I_{34}	I_{30}
142	144	ϵ_{32}	ϵ_{33}	ϵ_{34}	ϵ_{30}	...
		θ_{n10}	I_{35}	I_{36}	I_{37}	I_{31}
		ϵ_{35}	ϵ_{36}	ϵ_{37}	ϵ_{31}	...
142	144	θ_{n11}	I_{38}	I_{39}	I_{40}	I_{32}
		ϵ_{38}	ϵ_{39}	ϵ_{40}	ϵ_{32}	...
		θ_{n12}	I_{41}	I_{42}	I_{43}	I_{33}
142	144	ϵ_{41}	ϵ_{42}	ϵ_{43}	ϵ_{33}	...
		θ_{n13}	I_{44}	I_{45}	I_{46}	I_{34}
		ϵ_{44}	ϵ_{45}	ϵ_{46}	ϵ_{34}	...
142	144	θ_{n14}	I_{47}	I_{48}	I_{49}	I_{35}
		ϵ_{47}	ϵ_{48}	ϵ_{49}	ϵ_{35}	...
		θ_{n15}	I_{50}	I_{51}	I_{52}	I_{36}
142	144	ϵ_{50}	ϵ_{51}	ϵ_{52}	ϵ_{36}	...
		θ_{n16}	I_{53}	I_{54}	I_{55}	I_{37}
		ϵ_{53}	ϵ_{54}	ϵ_{55}	ϵ_{37}	...
142	144	θ_{n17}	I_{56}	I_{57}	I_{58}	I_{38}
		ϵ_{56}	ϵ_{57}	ϵ_{58}	ϵ_{38}	...
		θ_{n18}	I_{59}	I_{60}	I_{61}	I_{39}
142	144	ϵ_{59}	ϵ_{60}	ϵ_{61}	ϵ_{39}	...
		θ_{n19}	I_{62}	I_{63}	I_{64}	I_{40}
		ϵ_{62}	ϵ_{63}	ϵ_{64}	ϵ_{40}	...
142	144	θ_{n20}	I_{65}	I_{66}	I_{67}	I_{41}
		ϵ_{65}	ϵ_{66}	ϵ_{67}	ϵ_{41}	...
		θ_{n21}	I_{68}	I_{69}	I_{70}	I_{42}
142	144	ϵ_{68}	ϵ_{69}	ϵ_{70}	ϵ_{42}	...
		θ_{n22}	I_{71}	I_{72}	I_{73}	I_{43}
		ϵ_{71}	ϵ_{72}	ϵ_{73}	ϵ_{43}	...
142	144	θ_{n23}	I_{74}	I_{75}	I_{76}	I_{44}
		ϵ_{74}	ϵ_{75}	ϵ_{76}	ϵ_{44}	...
		θ_{n24}	I_{77}	I_{78}	I_{79}	I_{45}
142	144	ϵ_{77}	ϵ_{78}	ϵ_{79}	ϵ_{45}	...
		θ_{n25}	I_{80}	I_{81}	I_{82}	I_{46}
		ϵ_{80}	ϵ_{81}	ϵ_{82}	ϵ_{46}	...
142	144	θ_{n26}	I_{83}	I_{84}	I_{85}	I_{47}
		ϵ_{83}	ϵ_{84}	ϵ_{85}	ϵ_{47}	...
		θ_{n27}	I_{86}	I_{87}	I_{88}	I_{48}
142	144	ϵ_{86}	ϵ_{87}	ϵ_{88}	ϵ_{48}	...
		θ_{n28}	I_{89}	I_{90}	I_{91}	I_{49}
		ϵ_{89}	ϵ_{90}	ϵ_{91}	ϵ_{49}	...
142	144	θ_{n29}	I_{92}	I_{93}	I_{94}	I_{50}
		ϵ_{92}	ϵ_{93}	ϵ_{94}	ϵ_{50}	...
		θ_{n30}	I_{95}	I_{96}	I_{97}	I_{51}
142	144	ϵ_{95}	ϵ_{96}	ϵ_{97}	ϵ_{51}	...
		θ_{n31}	I_{98}	I_{99}	I_{100}	I_{52}
		ϵ_{98}	ϵ_{99}	ϵ_{100}	ϵ_{52}	...

フロントページの続き

(51) Int. Cl. 7

B 24 B 37/04

49/12

57/02

識別記号

F I

B 24 B 37/04

49/12

57/02

(参考)

K

(72)発明者 マヌーチャ ビラング
アメリカ合衆国, カリフォルニア州,
ロス ガトス, ファーヴル リッジ ロ
ード 18836

(72)発明者 ボグスロー スウィデック
アメリカ合衆国, カリフォルニア州,
サン ノゼ, ウィロー レイク レーン
1649

(72)発明者 ニルス ヨハンソン
アメリカ合衆国, カリフォルニア州,
ロス ガトス, ケネディ ロード
16450